

¹ Blasting Engineer, Urb Santa Fe D7-Tahuaycani, Arequipa, Perú (regina.rocha@orica.com)

² Blasting Technician, Urb. San Salvador C-1, Paucarpata, Arequipa, Perú (miguelangel.humpire@orica.com)

RESUMEN

Uno de los retos dentro de las operaciones unitarias de minería es la voladura, la cual presenta un impacto importante aguas abajo en los siguientes procesos, es por eso que las compañías mineras aseguran los resultados del proceso de voladura a través un trabajo en conjunto con empresas especialistas en explosivos.

En ese sentido, como parte de la excelencia operacional, se implementan sistemas de control y aseguramiento de calidad de todas las actividades que se producen en mina y conllevan a ejecutar la voladura en una mina de alta complejidad a fin de dar cumplimiento al diseño de carga.

Podemos detallar algunos puntos relevantes a controlar en el proceso de voladura:

- **Materias Primas (nitrato de amonio, emulsión, solución gasificante), proceso de fabricación y carguío de mezclas explosivas a través de camiones en terrenos secos y con agua, explosivos encartuchados como cargas puntuales en el taco en terrenos de alta dureza, sistemas de iniciación electrónica y pirotécnica.**
- **Control operacional desde el abastecimiento hasta la detonación para el correcto cumplimiento e implementación de los diseños durante el carguío de taladros, en esta actividad se genera información que se registra en plataformas digitales con reportabilidad inmediata.**

1. Introducción

En el presente trabajo se describe un sistema integral de calidad implementado en el proceso de carguío de explosivos en una mina a tajo abierto de cobre con una serie de variables técnicas y operativas más complejas en la actualidad como alto factor de carga en los taladros, carguío con múltiples mezclas explosivas y uso de explosivo encartuchado como carga puntual en el taco.

Los controles de calidad descritos capturan las buenas prácticas de aseguramiento y control de calidad en una mina a tajo abierto de cobre, los cuáles, tienen como finalidad el adherirse al cumplimiento de los diseños de voladura. Por consiguiente, obtener resultados positivos en los principales indicadores resultantes de la voladura como fragmentación, generación de gases nitrosos, tasas de *back up*, cumplimiento del horario de voladura.

2. Principales elementos en un sistema integrado de gestión de la calidad

Un sistema integrado de aseguramiento de la calidad aplicado a voladuras de alta complejidad se compone de: QA (*quality assurance*) que es la gestión que se desarrolla para proporcionar confianza de que se cumplirá los requisitos de calidad como el cumplimiento del diseño y principales indicadores de voladura; adicionalmente, el QC (*quality control*) busca cumplir los requisitos de calidad establecidos en la gestión del QA en cada actividad.

La figura N° 1 muestra cómo se relacionan las actividades que confirman el proceso unitario de voladura. En cada etapa se debe implementar controles para asegurar la calidad final de la voladura, esto es, desde la llegada de la materia prima y su almacenamiento, fabricación de mezclas explosivas en terreno con los camiones fábrica, establecimiento y ejecución de controles operativos que aseguran el cumplimiento de diseño en la malla de voladura y finalmente controles aplicados al sistema de iniciación electrónica para desarrollar con éxito la detonación en el horario planificado.

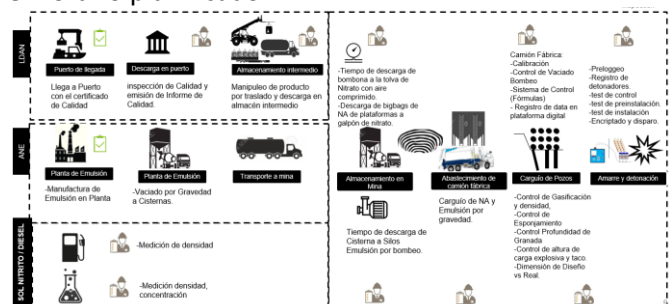


Figura N° 1 : Actividades del proceso de voladura

Fuente : Orica

2.1. Control de calidad de las materias primas

Las principales materias primas para la fabricación de las mezclas explosivas es el nitrato de amonio de baja densidad y la emulsión matriz. Dependiendo de la disponibilidad de personal se pueden realizar campañas de muestreo periódicas para evaluar la calidad del producto.

2.1.1. Nitrato de Amonio de baja densidad

Es una sal inorgánica higroscópica cuya porosidad interna permite la absorción de combustible para la fabricación de anfo y *heavy* anfo. El nitrato de amonio que llega a la mina atraviesa procesos de manipuleo, almacenamiento y transporte desde su manufactura hasta su consumo final en el taladro, sufriendo el prill un desgaste físico; es por ello importante realizar controles de calidad, tales como: medición de densidad, porcentaje de finos y porcentaje de absorción de petróleo.

La toma de muestra del nitrato de amonio de baja densidad se recomienda realizar al momento que llegan a mina y durante el abastecimiento para uso en los proyectos de voladura, de esta forma se permite identificar si la causa de la desviación se originó fuera o dentro de la mina. Si la desviación ocurre dentro de la mina, se procede a identificar causas tales como: almacenaje inadecuado, baja rotación del producto, parámetros de trasegado inadecuados, exposición a ciclaje térmico etc.

La gestión de inventarios debe considerar la distribución del consumo del nitrato de amonio LD en base a la antigüedad de fabricación consistente con el modelo FEFO (*First Expired, First out*).

2.1.2. Emulsión matriz

La emulsión a base de nitrato de amonio es un agente de voladura que mezcla una fase oxidante y otra combustible estabilizadas con un surfactante. Se transportan a las minas en cisternas, se trasiegan a silos de almacenamiento donde reposan hasta su consumo en los proyectos de voladura.

El producto cuenta con una ficha técnica que incluye información de los principales parámetros de calidad; además la emulsión cuenta con certificados de calidad que emite la planta de manufactura, es contra estos valores que es preferible comparar los resultados de los parámetros que se obtienen de la muestra de emulsión que se recolecta de la parte superior de la cisterna al entrar a mina. Esta muestra no se ve afectada por el proceso de descarga al silo y almacenaje. Durante la descarga de emulsión de la cisterna, esta

atraviesa un batido al pasar por la bomba de descarga y por la línea que la transporta al silo, al ser impulsada genera un aumento de la viscosidad que es posible medirla con muestreos en la descarga del silo de almacenamiento.

Se debe apuntar a administrar la rotación del silo del ingreso más antiguo al más reciente consistente con su fecha de fabricación, además se considera los tiempos de almacenamiento que recomienda el proveedor; sin embargo, las condiciones logísticas y ambientales en cada unidad minera es variable por lo cual se deben establecer monitoreos de controles de calidad cuantitativo (densidad, viscosidad y temperatura) y cualitativos (percepción visual y de tacto de formación de cristales en la emulsión).

Una emulsión con cristales deflagra y genera gases nitrosos, si la viscosidad supera la especificación podría ocasionar paradas mecánicas de los camiones fábricas por presiones altas en las bombas.

2.1.3 Solución de nitrito de sodio

La solución de nitrito de sodio se utiliza para otorgar sensibilidad a las mezclas explosivas cuyo porcentaje de emulsión sea superior al 50% a través de la formación de burbujas en el interior de la mezcla que produce un aumento del volumen de la mezcla explosiva. El control de calidad de la solución de nitrito incluye:

- Monitoreo de las cantidades empleadas al momento de su producción
- Tiempo de agitación suficiente para que el nitrito de sodio se diluya en agua.
- Agitación de la solución de nitrito previo al abastecimiento de los camiones fábrica.
- Verificación de la densidad y temperatura de nitrito de sodio.

2.2 Sistema de iniciación

Los sistemas de iniciación son los encargados de transferir la señal de detonación en el interior de los taladros, por ello la selección de un sistema de iniciación apropiada, juega un papel importante en el éxito de una voladura. Los sistemas de iniciación no solo controlan la secuencia de salida de los taladros, sino que también tienen repercusión en el tamaño de fragmentos de roca generada, desplazamiento de material, sobre quiebre y cantidad de vibración que se pudiera generar durante la voladura.

2.2.1 Sistema de iniciación Electrónica

Los sistemas de iniciación electrónica que actualmente existen en el mercado tienen gran impacto debido a sus características de seguridad y precisión de detonación con las que cuenta el sistema.

A continuación, en la Figura N°2 se describe un conjunto de medidas de control empleado en los sistemas de iniciación electrónicos para realizar una detonación segura.

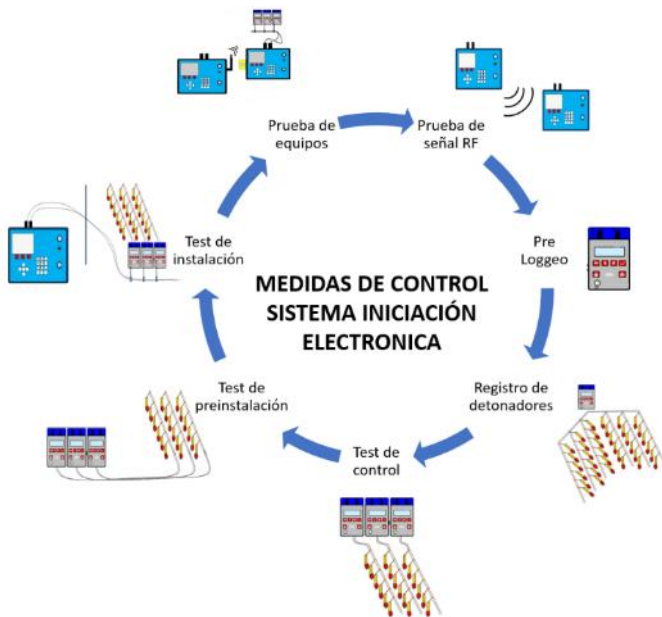


Figura N°2: Medidas de control del Sistema de iniciación electrónica

Fuente: Orica

2.2.1.1 Prueba de equipos

En gabinete se realizan pruebas de comunicación entre los equipos de programación y dispositivos de registro, se valida el Hardware, firmware y estado de batería de los equipos que serán empleados.

2.2.1.2 Prueba de señal RF

En esta etapa de control se realizará una prueba de señal RF entre el equipo receptor (Remoto) y el equipo de programación (Controlador), debiendo existir un enlace mayor o igual al 99% entre los equipos, esta prueba de señal y comunicación se debe realizar en el campo, para asegurar que durante la etapa de disparo no se tenga problemas por pérdida de señal.

2.2.1.3 Pre Loggeo de detonadores

Durante esta etapa de control se busca realizar una validación de la comunicación entre los detonadores electrónicos y el sistema, mediante un pre *loggeo* al 100% de los detonadores distribuidos en la malla de voladura, con la finalidad de identificar alguna situación crítica que pudieran poner en riesgo la integridad de los detonadores, esta etapa de control es continua en todo momento hasta el inicio del registro de los detonadores.

2.2.1.4 Registro de detonadores electrónicos

Previo al registro de los detonadores se debe cruzar información con el supervisor de voladura sobre la

cantidad de taladros cargados y detonadores distribuidos en la malla de voladura, con el fin de asegurar una coordinación y comunicación efectiva.

El registro o amarre de los detonadores se realiza con un dispositivo portátil que almacena los numero de ID de los detonadores, asignándole a cada detonador un tiempo de retardo. Adicionalmente el dispositivo revisa la comunicación de los detonadores y las posibles fugas de corriente del circuito. Todo esto se lleva a cabo después del proceso de tapado de los taladros, con esta segunda etapa de verificación se puede identificar otras condiciones que pudieran afectar el éxito de la voladura tales como:

- Fuga de corriente: las fugas de corriente pueden ser causadas por el daño en el cable del detonador, o cable de conexión entre el detonador y el dispositivo portátil de registro. Si la fuga de corriente es alta, se debe intentar en todo momento minimizarla con procesos de acuerdo a la condición que se presenta, en caso de que la fuga de corriente se excesivamente alta y este bloqueando el circuito lo cual impide que se continúe con el proceso de registro, se deberá activar la línea de respaldo no eléctrico (*back up*).
- Perdida de comunicación: la perdida de comunicación entre el dispositivo portátil de registro y el detonador electrónico se detecta principalmente durante la etapa de amarre de detonadores, debido a un corte de la línea del detonador electrónico. En el caso de que el taladro tuviera dos primas se descarta una prima del sistema y se continúa con el proceso de registro, en el caso que solo tuviera solo una prima se procede a la activación de la línea de respaldo no eléctrico (*back up*).

2.2.1.5 Test de control

Una vez finalizado el registro de los detonadores de toda la malla de voladura, se debe monitorear el comportamiento del circuito de la malla de voladura, realizando test de control, estos se deben realizar cada 20 minutos, durante los test de control se valida la comunicación con los detonadores con el sistema y se identifica fugas de corriente que pudiera existir en el circuito. Durante esta etapa de control se pueden identificar algunos errores tales como:

- Detonador sin respuesta (No Reply): Este error se produce porque se perdió la comunicación entre el dispositivo portátil de registro y el chip del detonador, esto podría darse por un mal aseguramiento a la línea del cable de amarre o

que se haya producido un corte en el cable del detonador.

- Detonador intruso: Este mensaje se produce cuando un detonador está conectado al sistema sin que se le haya asignado un tiempo de retardo. Para encontrarlo se hace una búsqueda por posicionamiento con el ID de detonador y hallarlo se le asigna un retardo.
- Error de lectura (RE): Las causas de este mensaje de error son provocadas por fugas de corriente o caídas de voltaje que no fueron controladas durante la etapa de registro de detonadores, en ambos casos se evidencia un daño en el cable. Otra causa es por presencia de corrientes vagabundas en el circuito. Para solucionar el error se debe realizar una búsqueda binaria hasta encontrar el causante del Error de lectura.

2.2.1.6 Test de preinstalación de equipos

Una vez finalizado el último test de control en la malla de voladura, se procede a realizar un test de preinstalación el cual se realizará a 200m del punto más cercano al área de voladura, con el fin de descartar que la línea de conexión que fue tendida hasta el punto de instalación de equipos pudiera haber sufrido un daño y generar errores de comunicación.

2.2.1.7 Test de instalación de equipos

En esta etapa de control interviene el equipo receptor (Remoto), el equipo iniciara con un Auto test para verificar estado de batería y Hardware del sistema, una vez finalizado el Auto test se procederá con el Test system con el cual se asegura que exista comunicación con los dispositivos portátiles de registro y los detonadores electrónicos registrados en la malla de voladura, una vez que se compruebe que exista comunicación al 100%, se procede con la encriptación. La cual conlleva a generar un código único de quema, para proceder con la voladura de manera segura.

2.1.2 Seguridad del sistema

El sistema de iniciación electrónica brinda medidas de seguridad muy altas.

- Los detonadores electrónicos cuentan con estructuras en sus circuitos que les brindan un alto nivel de resistencia a la electricidad estática, sobrevoltaje y radiación electromagnética.
- El dispositivo portátil de registro no cuenta con el voltaje necesario para iniciar a los detonadores por sí solo.

- El equipo de programación y disparo, son los únicos que cuentan con la energía suficiente para poder iniciar los detonadores electrónicos mediante el código de quema.

En todo momento el sistema está monitoreando el comportamiento del circuito, en el caso que se presente algún error en el sistema, este no permitirá continuar con el proceso, hasta que se encuentre la causa del error y se le de solución.

En el caso que algún detonador electrónico perdiera comunicación total con el sistema, por posible daño o existiera alguna fuga de corriente excesiva que termine bloqueando el circuito, se procederá a eliminarlo del sistema para emplear la línea pirotécnica de respaldo (*back up*) la cual será iniciada en superficie por otro detonador electrónico conectado a su tubo de choque. Este detonador electrónico deberá llevar un tiempo cero de tal forma que salga antes de la secuencia de disparo programado.

2.3. Equipos de control de calidad.

En la malla de voladura se debe contar con equipos y materiales que aseguren la calidad de las mediciones que se realizan, según la posibilidad de cada sitio estos deben estar calibrados o verificados con una frecuencia que se establece en un programa anual para tal fin.

Los ensayos de densidad de las mezclas explosivas en terreno y de materias primas en laboratorio requieren los siguientes equipos básicos: viscosímetro, vasos volumétricos, termómetro y balanzas. Es en el uso diario cuando se supervisa que estos equipos sean limpiados y almacenados correctamente después de usarlos; además se identifica si el equipo presenta daños para reemplazarlo.

2.4. Mezclas explosivas fabricadas por el camión fábrica

2.4.1. Revisión de densidad de la mezcla

Al iniciar el carguío de taladros con los camiones fábricas se debe obtener la densidad dentro del rango de especificación del tipo de explosivo. Si el explosivo es gasificable, se mide la densidad final entre los 20-30 minutos. De presentarse una densidad de la mezcla fuera de especificación, pero cercanos a los límites máximos y mínimos, se recomienda sacar una segunda muestra y si persiste, entonces se realizan ajustes de porcentajes de la formulación en el camión fábrica.

Es sugerible que durante el día del carguío se realicen ensayos de densidad a la mezcla explosiva del camión fábrica cada vez que se generen mezclas distintas. Estas

densidades deben ser registradas y almacenadas para ser presentadas ante auditorías de calidad.

En ocasiones se debe preparar en laboratorio las mezclas explosivas para validar la densidad promedio y los límites superior e inferior de la especificación.

2.4.2. Calibración del camión fábrica

La calibración de las materias primas en el camión fábrica permite asegurar la cantidad y porcentaje correcto de cada materia prima que compone la formulación de la mezcla el proceso consiste en verificar que la cantidad de kilos que arroja el camión según su sistema de control es equivalente a los kilogramos de esa materia prima según la lectura de una balanza con calibración vigente. Si existe un desfase de los kilos mayor a 2% se debe ajustar el factor de la materia prima en el sistema del camión fábrica.

Las calibraciones suelen realizarse con una frecuencia mensual o en caso se produzca una reparación y/o cambio de bomba que impulsa la materia prima o cuando se usa un producto nuevo con densidad diferente. Después de la calibración se completa los formatos para evidenciar su ejecución ante una auditoría de calidad.

2.4.3. Manejo de la manguera de descarga del explosivo

La manguera del camión fábrica permite el carguío de explosivos en modalidad bombeable con mezclas de *heavy anfo* con porcentaje de emulsión superior a 65%, esta debe contar con la longitud suficiente para que ingrese al fondo del taladro.

Las primas deben ser elevadas medio metro respecto al fondo de taladro en caso cayera detritos no entierre la prima y así se asegura una adecuada iniciación de la columna explosiva. Cuando hay columnas altas de agua superior a medio metro, la manguera del camión fábrica debe introducirse al fondo del taladro y elevarse a un metro para iniciar el bombeado de la mezcla explosiva, de esta manera se consigue que el explosivo cubra a la prima y que la mezcla se ubique al fondo sin que flote la prima encima de la mezcla.

Un bombeado adecuado permite que el explosivo se aloje al fondo del taladro, desplazando la columna de agua en la parte superior de esta; así se garantiza que el agua no este debajo de la mezcla explosiva y como su densidad es inferior a la de algunos explosivos bombeables, busque salir a superficie generando contaminación y discontinuidad en la mezcla explosiva que podría devenir en la generación de gases nitrosos durante la voladura.

2.5. QA QC mediante plataformas digitales

El equipo de voladura conformado por ingenieros de la empresa minera y contratistas reciben los proyectos a cargarse con explosivos por parte del equipo de perforación, a través de software los proyectos de voladura se suben a las plataformas digitales y posibilita que el operador de camión fábrica a medida que realiza el carguío, registre datos reales del taladro en las plataformas digitales en tiempo real. Estos datos son principalmente: longitud real del taladro, longitud de diseño, altura de columna de agua y cantidad de

explosivo real; con esta data es posible comparar la longitud real del taladro con la longitud planificada, de esta forma podemos encontrar desviaciones que permitan al equipo de perforación mejorar su precisión. En un estudio B. Corrêa (2021), haciendo uso de una plataforma digital encontró zonas sub perforadas que podrían generar pisos desnivelados y bolonería. Por otro lado Kyeremateng, Tannor & Juati (2019) señala que la sobre perforación no controlada genera pérdida de la cresta.

La figura N°3 haciendo uso de la plataforma digital se visualiza la desviación de la perforación real respecto al diseño para un proyecto de voladura, el cual reporta un cumplimiento de 12% de la perforación de acuerdo a un rango de tolerancia establecida. En azul se encuentran los taladros cuya longitud de perforación fue menor a lo planificado.

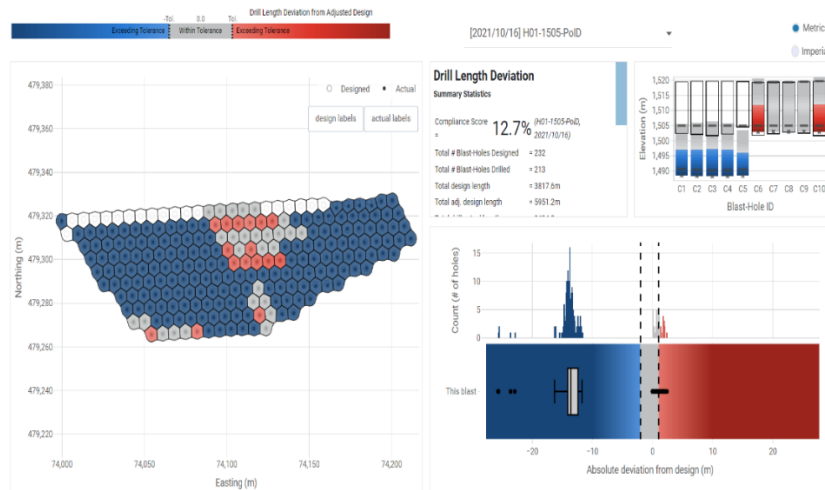


Figura N°3 : Desviación en la perforación
Fuente : Orica

Es posible registrar en las plataformas digitales taladros que por condiciones del terreno se derrumbaron y se dejaron sin carga explosiva, este dato cobra relevancia para los ingenieros que realizan seguimiento a la fragmentación de los frentes de minado pues permite ubicar zonas de gruesa fragmentación donde mina la pala y contrastarlo con el proyecto de voladura de donde proviene el minado. Si hubo taladros tapados cerca de la zona de fragmentación deficiente estaríamos dando con la causa de la desviación. En la figura N°4, se observa un sector del proyecto de voladura cuya leyenda es « Abandoned », es decir, durante el minado se encontrarán sobretam años en ese sector.

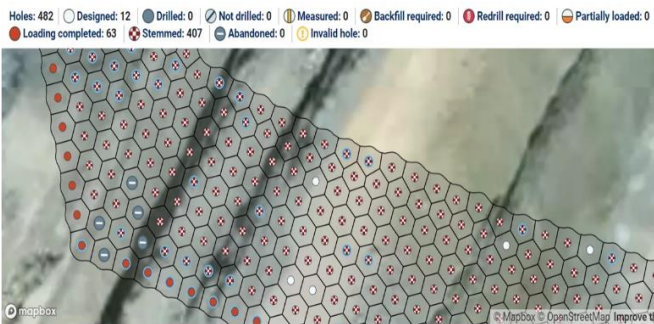


Figura N°4 : Estado de los taladros en tiempo real
Fuente : Orica

El acompañamiento de las plataformas digitales durante el carguío facilita la generación de reportes de consumo de mezclas explosivas y materias primas en menor tiempo en comparación con la reportabilidad de consumo de hace unos tres años, la cual era consolidado al término del carguío en una planilla electrónica a partir de digitar formatos con información ingresada a mano por los operadores de camión fábrica durante el carguío.

3. Aseguramiento del cumplimiento del diseño en la malla de voladura

Una voladura de alta complejidad puede presentar las siguientes características: proyectos de voladura con más de 600kg de explosivos, uso de tres o más mezclas explosivas en un proyecto y explosivo encartuchado posicionado en el taco. Bajo esas condiciones, el equipo de carguío debe sostener en el tiempo el cumplimiento del diagrama de configuración de columna de carga para alcanzar los resultados de voladura previstos desde el diseño. Esto se logra con un equipo de operadores de carguío entrenados, comprometidos con la excelencia operacional y además que conozcan el impacto de cada actividad respecto a otra. Por consiguiente, la supervisión contrata-empresa minera periódicamente debe realizar seguimiento de las medidas establecidas en el diseño como: altura de la carga explosiva y altura del taco intermedio donde se posicionará la emulsión encartuchada.

3.1. Control de altura de la mezcla explosiva

Entre los principales factores que contribuyen a no llegar al taco final de diseño se encuentran:

- Altura de perforación mayor al diseño
- Agrietamiento en el interior del taladro.
- Falta de calibración de los camiones fábrica
- Pericia del operador que ejecuta la medición del taco del explosivo.

Entre las medidas adoptadas para llegar al taco objetivo se tuvo:

- Manejar una tolerancia equivalente a los kilos de la carga lineal como un adicional que se agrega al taladro para llegar a la longitud objetivo.

- Se aseguró que los operadores que dan soporte al camión fábrica conozcan los esponjamientos reales de las mezclas explosivas *heavy anfo* 55 y *heavy anfo* 73 para que puedan parar el carguío considerando el esponjamiento real.
- Mediciones realizadas junto al operador para verificar que está dejando el taco inicial del explosivo considerando el esponjamiento real del *heavy anfo* utilizado.
- Mediciones del taco final de los explosivos a 30 minutos para validar su esponjamiento real.

3.1.1. Gasificación de la mezcla explosiva

El uso de solución gasificante otorga sensibilización a la mezcla explosiva a través de la formación de burbujas dentro del explosivo, resultando en una reducción de la densidad aparente de la mezcla explosiva y un aumento de su volumen (esponjamiento de la mezcla) al interior del taladro, el cual se refleja con una reducción de la medición del taco del explosivo (distancia desde el nivel de la mezcla explosiva esponjada al collar del taladro).

En una mezcla de *heavy anfo* 55 (ver figura N°5) se observa el estado inicial de la mezcla (izquierda), luego transcurridos 30 minutos (derecha) se genera en su interior vacíos causados por la gasificación.



Figura N°5: Gasificación inicial y final de HA55
Fuente: Orica

Para una misma inyección de solución gasificante aplicada a *heavy anfo* 55 y *heavy anfo* 73, se observa que mientras más porcentaje de emulsión contengan los *heavy anfo*, la mezcla explosiva esponjará más dentro del taladro. Asimismo, la temperatura ambiente afecta proporcionalmente la temperatura de la mezcla explosiva y acelera la gasificación.

Es importante realizar seguimiento de la gasificación a los camiones fábrica y realizar ajustes en la inyección de solución gasificante hasta llegar a la densidad de copa objetivo. Se dibujan curvas de gasificación cada cinco minutos que al analizarlas se puede establecer

una densidad objetivo a los 5 minutos de iniciado el proceso de gasificación, con esta densidad objetivo se pueden realizar ajustes en el porcentaje de inyección del camión fábrica sin necesidad de que transcurra 20 o 30 minutos, con ello se logra entregar una mezcla con la gasificación dentro de especificación sin esperar a obtener la densidad de copa. En la figura N°6 se tiene dos curvas de gasificación de una mezcla explosiva de *heavy anfo* aluminizado cuya densidad de copa a los 30 minutos tiene como especificación 1.20 g/cc [+/- 0.03], se dibujaron dos curvas de gasificación cuyas densidades de copa estuvieron dentro de la especificación; como regla práctica viendo la Figura N°6 podemos tomar como referencia la densidad en un menor tiempo de gasificación (t = 5 minutos) y establecer como rango en ese tiempo una densidad entre [1.25 -1.27]g/cc, es decir, si un camión fábrica presenta una densidad a los 5 minutos de 1.29 g/cc se solicitará al operador que aumente la inyección de solución gasificante por encontrarse fuera del rango práctico que se estableció a los 5 minutos de gasificación.

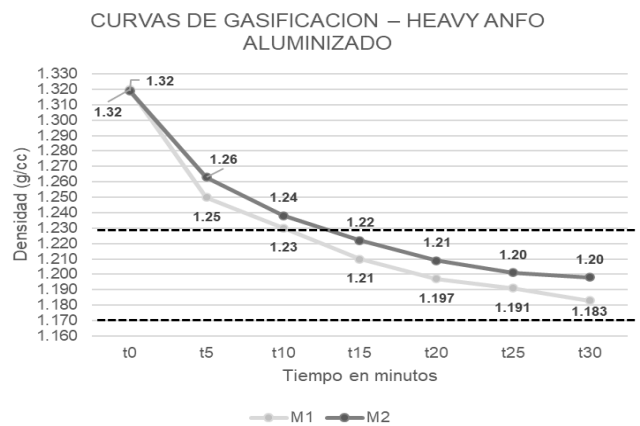


Figura N°6: Curva de gasificación del *heavy anfo* aluminizado
Fuente: Orica

3.1.2 Consideración de esponjamiento del explosivo

Los operadores que miden el taco de la mezcla explosiva deben dejar como altura inicial una medida que considere la altura de esponjamiento del producto, debido a que esta variará directamente proporcional al porcentaje de emulsión que contenga la mezcla para una misma inyección de solución de nitrito.

Se monitorea con frecuencia el esponjamiento real de las mezclas explosivas midiendo la altura del taco de la mezcla inicial, se espera 20-30 minutos y se vuelve a medir el taco del explosivo gasificado esponjado, este diferencial de altura es el esponjamiento que el operador debe considerar durante el carguío de taladros, es decir, a la altura de diseño objetivo se le descuenta la altura de esponjamiento.

El equipo responsable de la voladura debe asegurar el tiempo suficiente para que el explosivo gasifique y aumente su volumen al interior del taladro. Si se tapa el taladro en un tiempo menor a 20 minutos, la mezcla explosiva gasificada no logrará un aumento del volumen; por tanto, se restará altura de carga explosiva cercano al collar que afectará a la fragmentación del taco.

3.2. Control de altura del explosivo encartuchado en el taco

El carguío de alta complejidad para una mina de cobre a tajo abierto puede incluir el uso de explosivo encartuchado en el taco con el fin reducir los sobre tamaños en superficie, mejorando así los resultados evidenciados en el posterior análisis de fragmentación del frente de minado.

3.2.1. Posicionamiento adecuado del explosivo encartuchado en el taco

Una buena práctica para la reducción de sobre tamaños en la fragmentación del taco es el uso de emulsiones encartuchada con peso entre 6.25kg – 14 kg, posicionada a una profundidad de 2.0m a 3.0m desde el collar del taladro. Luego de que el camión fábrica carga el taladro con la mezcla explosiva se le adiciona un taco intermedio de grava con una altura según diseño; seguidamente se posiciona el explosivo encartuchado. En caso la carga explosiva a granel no llegue al taco de diseño se consume una mayor cantidad de grava para llegar al taco intermedio objetivo de diseño donde se posiciona el explosivo encartuchado; es por ello, la importancia del control de gasificación y la altura de la carga explosiva. En la figura Nº 7 se explica las principales causas de la variabilidad de la altura del taco intermedio donde se sienta al explosivo encartuchado.

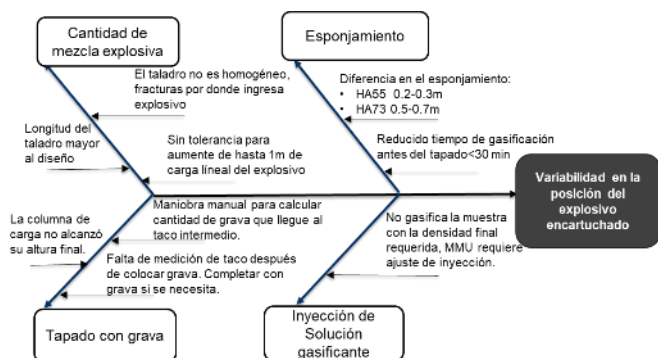


Figura Nº 7: Análisis de causa raíz
Fuente: Orica

3.2.2. Supervisión y monitoreo de la altura del taco intermedio

Se realizó una línea base del control de la altura del taco intermedio, actividad que lo ejecuta el operador de equipo auxiliar y su ayudante de tapado. Posteriormente se implementaron seguimientos mediante mediciones *in situ* de la altura del taco intermedio detrás del equipo auxiliar, dándoles retroalimentación de su porcentaje de éxito que estuvo dentro del rango establecido, además de corregir *in situ* los taladros cuya altura de taco intermedio era mayor a la especificación.

Para un diseño cuya altura objetivo de taco intermedio con grava es 2 m antes de posicionar la emulsión encartuchada, se registraron mediciones sostenidas en el tiempo. Como resultado se observa en la figura Nº8 una mejora creciente a la actualidad con relación al promedio y la dispersión de las mediciones realizadas a la altura del taco intermedio.

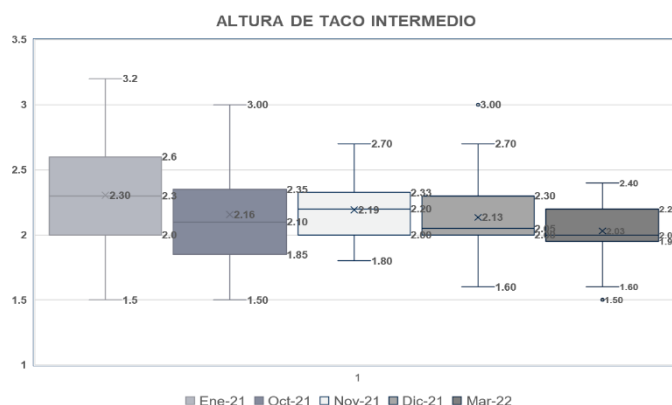


Figura Nº8: Boxplot de altura de taco intermedio
Fuente: Orica

El aseguramiento de la posición según diseño del explosivo encartuchado conlleva a una mejor distribución de la energía en la parte del taco del taladro; por consiguiente, se evidencia una mejora en la fragmentación superficial del material volado. En la figura Nº9 se presentan dos casos a analizar en términos de energía y fragmentación, en el caso 1 el taco intermedio de grava es a 2m del collar y en el caso 2, el taco intermedio es de 3m.

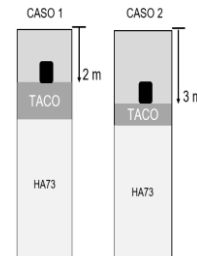


Figura Nº 09: Casos de análisis según la altura de taco intermedio. Fuente: Orica.

3.2.2.1 Simulación con Halos de energía

Con el objetivo de validar el impacto que se tiene al no ubicar el explosivo encartuchado dentro del rango

establecido, se realizó simulaciones de halos de energía que muestren los efectos de daño que se tiene con la liberación de energía de estos explosivos encartuchados los cuales tendrán una influencia en la fragmentación de rocas en la zona del taco.

- En la figura N° 10, la ubicación del explosivo encartuchado a 2.0m de la superficie tiene un mayor impacto de los halos de energía en la zona del taco.

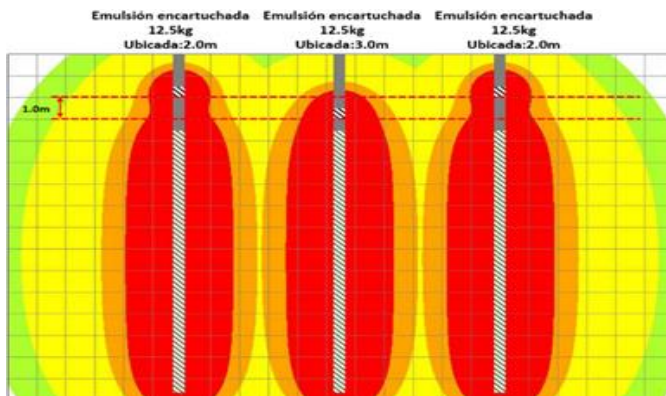


Figura N° 10: Halos de Energía vista en perfil
Fuente: Orica

- En la figura N° 11, la simulación con vista en planta muestra el impacto que tiene los halos de energía a un corte 1.5m de la superficie

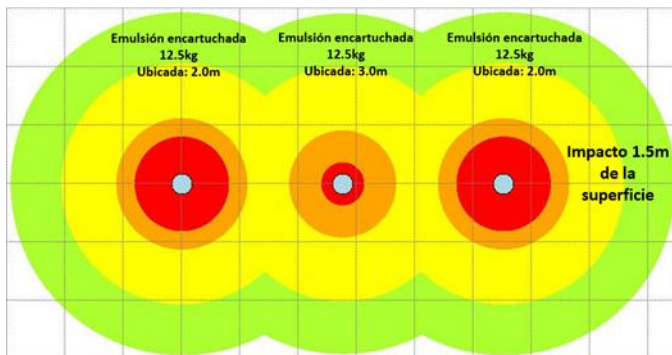


Figura N°11: Halos de Energía vista en planta
Fuente: Orica

3.2.2.2 Evaluación de fragmentación

Con el fin de conocer la afectación a los sobre tamaños en superficie por colocar la carga explosiva a 3m del collar, en un mismo proyecto de voladura se realizó un ensayo para medir la variación del P100 de la fragmentación superficial comparando los dos casos:

- Caso 1: Colocación de emulsión encartuchada a 2 m del collar
- Caso 2: Colocación de emulsión encartuchada a 3 m del collar

En la fragmentación superficial de la figura N° 12 se observa el resultado de los dos casos llevados a prueba

en terreno, visualmente se percibe mayor sobre tamaños en la superficie del caso 2.

El análisis de fragmentación (figura N° 13 y 14) indica que hubo una reducción del 21% del P100 al colocar el explosivo encartuchado a una posición de diseño de 2 m respecto a colocarlo a 3 m del collar.

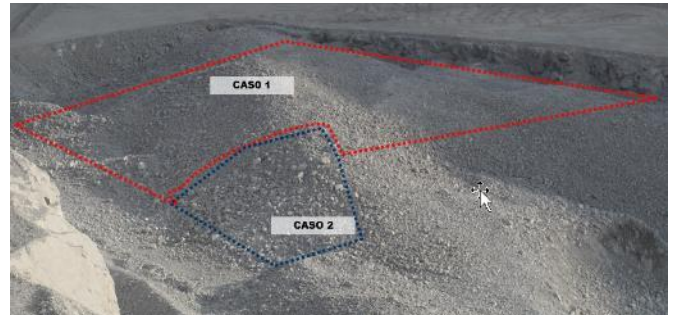


Figura N° 12: Fragmentación superficial de los casos de estudio (1) y (2)
Fuente: Orica

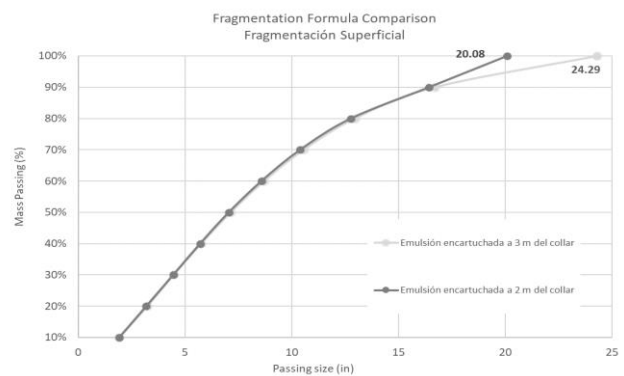


Figura N° 13: Curva de distribución granulométrica comparativa de los casos (1) y (2).
Fuente: Orica

Comparación Fragmentación Superficial Segun la posición de la emulsión encartuchada		
Porcentaje pasante (%)	Emulsión encartuchada a 3 m del collar	Emulsión encartuchada a 2 m del collar
	Tamaño de fragmento (in)	Tamaño de fragmento (in)
10%	1.89	1.93
20%	3.23	3.19
30%	4.45	4.45
40%	5.75	5.71
50%	7.13	7.05
60%	8.70	8.58
70%	10.55	10.39
80%	12.95	12.76
90%	16.69	16.42
100%	24.29	20.08

Figura N°14: Tabla resumen de los resultados de fragmentación comparativa de los casos (1) y (2).
Fuente: Orica

4. Prácticas operativas para la reducción de eventos producto de la voladura

4.1. Mitigación de gases nitrosos en la mina

Cuando ocurre la voladura con productos derivados del nitrato de amonio (anfo y emulsión), como consecuencia de la combustión se generan gases no tóxicos como nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua; sin embargo, señalan que “la aplicación de explosivos en terreno bajo condiciones variables conlleva a una reacción explosiva no ideal que produce gases tóxicos como el dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de nitrógeno (NO) y monóxido de carbono (CO).” (DEEDI,2011, p. 8).

El dióxido de nitrógeno es uno de los gases más tóxicos que podría generar una voladura, es por ello que mediante la verificación del color y extensión de los gases nitrosos se los clasifica en niveles (AIESG, 2011).






Level	Typical Appearance
Level 0 No NOx gas	
Level 1 Slight NOx gas	
1A Localised	
1B Medium	
1C Extensive	
Level 2 Minor yellow/orange gas	
2A Localised	
2B Medium	
2C Extensive	
Level 3 Orange gas	
3A Localised	
3B Medium	
3C Extensive	
Level 4 Orange/red gas	
4A Localised	
4B Medium	
4C Extensive	
Level 5 Red/purple gas	
5A Localised	
5B Medium	
5C Extensive	

Figura N° 15: Clasificación de nivel de gases
Fuente: Prevention and management of blast generated NOx gases in surface blasting(AIESG).

Un indicador de calidad de las voladuras es el nivel de gases generado, si bien su presencia se sustenta en diversos factores contribuyentes, se describirá algunos controles operacionales que puede ejecutar el equipo de voladura en una mina, estos son:

- Control de calidad de las materias primas según lo descrito en la Sección 2.1.
- Aseguramiento de la inyección de petróleo para fabricar anfo, un porcentaje inferior al 6% generan gases nitrosos, esto se muestra en la figura N° 16. El camión fábrica debe calibrarse periódicamente el petróleo para evitar variación entre la cantidad real que entrega respecto a lo indica su sistema de control.

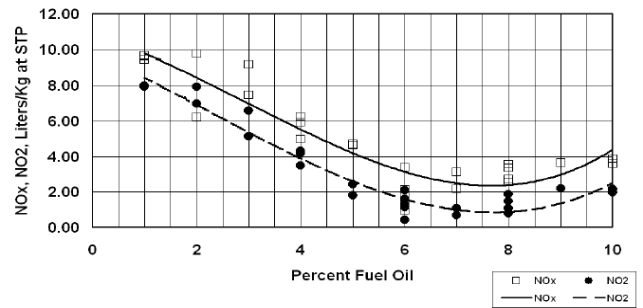


Figura N° 16: Efecto del porcentaje de petróleo en la generación de gases.

Fuente: Management of oxides of nitrogen in open cut blasting (DEEDI,2011).

- Realizar mediciones de altura de agua antes de iniciar el carguío con explosivos. En la práctica se observa que la altura de columna de agua varía en algunos taladros medidos con 24 horas de anterioridad; asimismo taladros considerados sin altura de agua un día antes, al día siguiente sí podrían tenerla. Es relevante identificar correctamente el agua para decidir qué mezcla explosiva usar, una mala identificación podría conllevar a usar explosivos no resistentes en taladros con altura de agua, generando así degradación del anfo en la mezcla no resistente al agua que producirá gases nitrosos durante la voladura.
- En terreno, en el momento del carguío con explosivos se puede zonificar taladros con agua para ser cargados con explosivos resistentes al agua, en caso el diseño original priorice su carguío con mezclas explosivas de baja o nula resistencia. En la figura N° 17, se muestra un proyecto con taladros que presentan altura de agua y se enmarca el sector que en campo se sugiere cargar con mezclas explosiva resistente al agua en caso exista agua en un taladro identificado como seco.

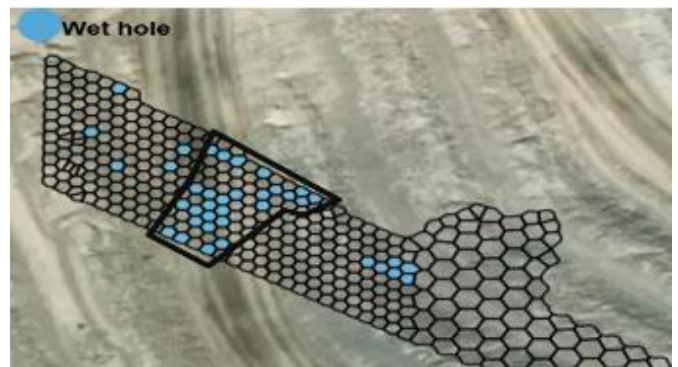


Figura N° 17: Taladros con columna de agua
Fuente:Orica

4.2. Control y eliminación de misfires

Se produce un tiro quedado o misfire cuando el explosivo no detona durante la voladura, esto configura un riesgo de detonación no planificada que podría afectar a personas, equipos, pérdida de productividad del minado y altos costes por excavación con equipo auxiliar; además, su hallazgo en terreno supone una excavación manual que no cause daños al personal, equipo de excavación o afectaciones en el chancado y/o transporte por fajas del material volado que contiene el detonador.

En el Perú la gran minería emplea detonadores electrónicos, respecto a estos C.M. Lownds y U. Steiner (2010), señala que la comunicación bidireccional del detonador permite *loggear* en diferentes etapas antes o después del carguío de taladros y antes de iniciar la voladura; si en estas revisiones no hay comunicación es probable la ocurrencia de un corte durante el carguío del taladro o tapado, se podría proceder así:

- Si lo tuviera, revisar el segundo detonador electrónico ubicado en la misma carga del taladro está comunicándose.
- Activar el respaldo pirotécnico.
- Levantamiento de coordenadas del potencial *misfire* para ser monitoreado en la excavación

Cuando se activa el respaldo pirotécnico o *back up* existe la posibilidad que también se encuentre dañado y no detone, por lo que este taladro es el primero en salir en la secuencia del disparo y se evidencia su detonación mediante filmación y/o registro de vibración con el sismógrafo. Si no hay evidencia de su detonación se declara como *misfire*. Los respaldos recurrentes podrían ser indicativos de la ocurrencia de un misfire.

Se analizó la tasa de *back up* de tres minas a tajo abierto más grandes del Perú correspondiente a un mes. En la figura Nº 18 se muestra que la tasa de *back up* de la mina C es más baja respecto a las minas A y B.

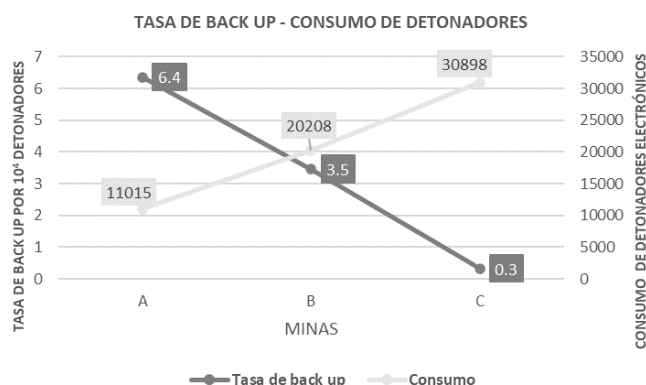


Figura Nº 18: Tasas de *back up* en tres minas del Perú
Fuente:Orica

A continuación, se comparan los principales aspectos operacionales que podrían ser la causa de la diferencia en las tasas de *back up* en las tres minas analizadas, se muestra un resumen comparativo en la figura Nº 19

Mina	A	B	C
Material de tapado	Detritos de perforación	Detritos de perforación	Gravilla (piedra chancada)
Doble prima	No	Desmonte no/Mineral sí	Desmonte sí/Mineral sí
Sobre perforación	0.5m	1m	0.5m
Turno noche	No	Sí	No
Personal de tapado	Ajeno a la contrata	De contratista	De contratista
Diámetro de taladro (in)	12 1/4	12 1/4	10 5/8

Figura Nº 19: Comparación de condiciones operativas que podrían generar *back up's*
Fuente:Orica

- El uso de doble iniciación en la columna de carga permite que en caso un detonador no replique, el taladro se inicie con el detonador electrónico de la segunda prima. Esta práctica lo realiza la mina B solo en zona de mineral más no en desmonte donde por lo general ocurrieron los *back up's*. Por otro lado, la mina A emplea doble iniciación tanto en mineral y en el desmonte, en este último se realiza un agregado selectivo de la segunda prima en taladros de cresta, cercanos al talud, zonas de relleno y a taladros con fracturación en el collar tras una inspección visual.
- En las tres minas el equipo de tapado es el minicargador; sin embargo la mina C que presentó la menor tasa de *back up* emplea gravilla o piedra chancada de 1 1/2" de diámetro las cuales se encuentran apiladas en rumas de donde el

operador del minicargador extrae el material y se dirige al taladro para tapanlo, manteniendo el cucharon del equipo elevado mientras vacía el material (figura Nº 20 derecha); por otro lado las minas A y B usan detritos de perforación que están en el collar del taladro a tapan, el cucharón del equipo de tapado mantiene contacto con el piso del collar (figura Nº 20 izquierda) para llenar el cucharón y vaciarlo al taladro, pudiendo alzar rocas grandes del piso del collar que impactarían con las líneas de detonadores.



Figura Nº 20: Tapado con detritos de perforación versus grava.

Fuente:Orica

- La sobre perforación de 1m en la mina B genera daños en el collar del taladro, esta roca fracturada sumado al detrito de perforación como material de tapado aumentan el riesgo de cortes en la línea de detonadores.
- La gran minería en Perú terceriza con empresas especializadas el servicio de voladura, uno de los indicadores de su desempeño es la tasa de *back up* que generan, en la mina A la actividad de tapado de taladros lo realiza personal que no pertenece a la contrata de voladura; por tanto, el indicador no les impacta en su evaluación.
- La mina B es la única en presentar turno noche donde se ejecutan las actividades de voladura, es posible que se de una reducción de la visibilidad para detectar sobre tamaños en el material de tapado que finalmente va al taco pudiendo dañar las líneas de detonadores.

5. Conclusiones

- En una mina a tajo abierto es posible implementar un sistema integrado de control y aseguramiento de la calidad que considere los elementos incorporados en el desarrollo de las actividades de

voladura tales como: materias primas, sistemas de iniciación, equipos de medición, prácticas operativas y plataformas digitales. Estos controles aplicados a estos elementos pueden ser auditados por la empresa minera o contratistas para asegurar que la ejecución de las actividades genera una voladura de calidad.

- Realizar controles de calidad al ingreso del producto y al momento de su consumo permite identificar aspectos operativos donde se origina la desviación de calidad.
- Durante el carguío de explosivos en terreno se debe establecer mediciones periódicas de los principales parámetros de las actividades que permitan asegurar el cumplimiento del diseño tales como:
 - Densidad inicial y final de la mezcla explosiva
 - Control de altura de la mezcla explosiva y su esponjamiento.
 - Control de altura del taco intermedio para posicionar el explosivo encartuchado a la altura esperada.
- Las plataformas digitales que registra información del estado de carguío en tiempo real permiten encontrar de forma visual y rápida desviaciones en la perforación; así también, es una herramienta que facilita la reportabilidad de los consumos de explosivos en cada proyecto de voladura.
- El aseguramiento de la correcta ubicación de la emulsión encartuchada nos permite tener una mejor distribución de la energía en la zona del taco, la cual se ve reflejada en una mejor fragmentación superficial.
- Según el análisis de fragmentación se obtuvo una reducción del P100 (indicativo de sobre tamaños) en 21% al colocar el explosivo encartuchado a 2m en lugar de 3m. Es decir, una desviación de 1 m en colocar el taco puede afectar en 21% la presencia de sobre tamaños en el taco.
- Los sistemas de iniciación electrónica nos permiten tener mayor control de la malla de voladura, siguiendo los controles y las medidas de seguridad con las que cuenta el propio sistema y así identificar de manera oportuna la perdida de la comunicación con los detonadores electrónicos, los cuales pueden generar eventos no deseados como tiros quedados, los cuales representan un gran riesgo para la operación minera.
- La generación de gases nitrosos puede controlarse en mina asegurando la inyección suficiente de petróleo por parte de los camiones fábrica a través

de la calibración y controlando la identificación certera de presencia de agua en los taladros.

- Se puede asociar como un factor que produce una tasa baja de *back up* en una mina a *lo siguiente* :
 - Uso de doble prima (dos detonadores pirotécnicos y dos electrónicos).
 - Consumo de grava como material de tapado pues ayuda a que el cucharón del minicargador se eleva para vaciar del material sin que empuje rocas sueltas con sobre tamaños del collar.

Agradecimientos

- A Victor Vega y Jorge Cárdenas que a través de su experiencia y retroalimentación permitieron la generación de este trabajo.

Referencias [apellidos en minúsculas]

Australian Explosives Industry And Safety Group Inc.2011. Code of practice prevention and management of blast generated NOx gases in surface blasting, p.25-26.

Orica. 2016. Blasting Engineers Essential Knowledge, p.15-38.

Lownds C.M., Steiner U. 2010. Safety of Blasting with Electronic Detonators, p.8-9.

Orica. 2021. Amare e iniciación de detonadores electrónicos I-kon™ sistema remoto Blaster 3000 y Logger II, p.2-3.

Corrêa B., Blast Control: control eficiente y completo de perforación y voladura. 2021, p.6-8.

Department of Employment, Economic Development and Innovation (DEEDI). 2011. Management of oxides of nitrogen in open cut blasting, p.7-9.

Kyeremateng R., Tannor C., Juati R. 2019, BlastIQ™ Control Solution, Addressing Drill & Blast Challenges at Newmont Goldcorp Akyem, p.1-2.

Perfil profesional

Ingeniera de minas egresada de la PUCP, con 4 años de experiencia en el rubro de explosivos en el área comercial, operaciones, planificación del suministro y control de calidad.

Nombre del autor: Regina Rocha Oriundo

Cargo: *Blasting Engineer*

Empresa:Orica Mining Seriveces Perú S.A

Correo electrónico: regina.rocha@orica.com

Teléfono / Celular:+51 943 777 7471

Dirección: Urb. Santa FeD7, Sachaca. Arequipa.

Perfil profesional

Ingeniero de Minas egresado de la UNSA, Ingeniero de voladura en Orica, con 3 años de experiencia en

operaciones de voladuras en tajo abierto.

Nombre del coautor (1): Miguel Humpire Huamani

Cargo: Blasting Technician

Empresa: Orica Mining Services Perú S.A

Correo electrónico: miguelhumpireh@orica.com

Teléfono / Celular: 953878816

Dirección: Urb. San Salvador C-1, Paucarpata. Arequipa